

## O uso de sensor remoto SAR na banda C e sua relação com atributos biofísicos da vegetação de mangue em regeneração.

Michele Ferreira Cougo<sup>1</sup>  
Pedro Walfir Martins e Souza Filho<sup>1,2</sup>  
Arnaldo de Queiroz da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará – UFPA/ Instituto de Geociências, Cidade Universitária,  
Caixa postal 8608, 66075-110 – Belém – Pará, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Vale de Tecnologia e Desenvolvimento Sustentável, Rua Boaventura da Silva, 955,  
66055-090 – Belém – Pará, Brasil.  
{mcougo, walfir, arnaldoq}@ufpa.br

**Abstract.** Mangrove productivity is directly linked to biomass and can be estimated being structural parameters of vegetation through allometric equations. In this sense, SAR remote sensing data have been employed by the possible relationship between vegetation structural attributes and the radar backscattering because this energy interact with the vegetation components depending on the frequency used. The goal of this work is analyse the relationship through regression statistical models of backscattering of a multi-polarized Radarsat-2 image with vegetation structural attributes in the Bragança Peninsula (northeastern coast of Pará). Field data was taken in 17 plots of 10 square meters. Structural characterization of the plots was made with the following field data: CBH (circumference at breast height), height and specie in 3090 specimen and then it were estimated values of DBH (diameter at breast height) and BA (basal area). For the simple regression models the image in polarization  $\sigma^{\circ}_{VH}$  showed the highest correlation with all vegetation attributes. However, when the  $\sigma^{\circ}_{HH}$  and  $\sigma^{\circ}_{VV}$  polarizations were inserted the explanatory strength of the models had increase between 11 - 19% for the height estimation models and between 20 - 27 % for the horizontal structure estimation models and biomass. The multiple regression models got the best adjustments with the biophysical parameters mean height, DBH and biomass ( $r^2$  values were respectively 0.81, 0.79 and 0.79). Based on these results we can say that Radarsat-2 images in C band are suitable for the estimation and prediction of vegetation attributes of the mangrove ecosystem.

**Palavras-chave:** Radarsat-2, statistical models, mangrove biomass, modelos estatísticos, biomassa do manguezal.

### 1. Introdução

Os manguezais constituem um dos ecossistemas mais produtivos do mundo, com grande estoque de C, representa uma fonte de nutrientes e matéria orgânica para os ambientes costeiros adjacentes, favorecendo uma teia alimentar aquática complexa (Hogarth, 1999; Khatiresan e Bingham, 2001). Além disso, protegem e estabilizam a costa, são viveiros e criadouros de espécies da fauna, geram bens e serviços formando assim um ecossistema com grande importância ecológica e econômica (Alongi, 2002; Lugo e Snedaker, 1974; Spalding et al., 2010). A produtividade do manguezal está diretamente ligada à biomassa e pode ser estimada a partir dos parâmetros estruturais da vegetação através de equações alométricas.

Neste sentido, dados de sensores remotos, em especial SAR, têm sido empregados pela possível relação dos atributos estruturais da vegetação com o retroespalhamento do radar, devido esta energia interagir com os componentes vegetacionais como ramos, galhos e troncos (Ranson e Sun, 1994; van der Sanden, 1997). O radar de abertura sintética (SAR) é o sensor apropriado para obter dados em baixa latitude devido sofrer pouca interferência das condições atmosféricas (nuvens, chuvas e fumaças). Alguns estudos relacionam o retroespalhamento do radar com os parâmetros estruturais da vegetação, direcionados a dosséis florestais homogêneos visando à estimativa de biomassa (Kovacs et al., 2006; Mougin et al., 1999; Proisy et al., 2002; 2008; Simard et al., 2006). Recentemente, Kovacs et al. (2013a, b) publicaram as estimativas de

atributos estruturais de florestas degradadas de mangue na costa pacífica do México utilizando imagens multipolarizadas na banda C (Radarsat-2) e banda L (ALOS PALSAR).

A área de manguezal estudada está inserida na Península Costeira de Bragança (costa nordeste do Pará). A vegetação se apresenta em regeneração após período de degradação devido à construção de uma rodovia, há cerca de 40 anos, que causou distúrbios no regime hidrológico ocasionando a morte da vegetação no local (Souza Filho e Paradella, 2002).

O objetivo deste estudo é avaliar a relação entre os atributos estruturais da vegetação de mangue em regeneração com dados provenientes do sensor Radarsat-2 (banda C), através de modelos estatísticos de regressão.

## 2. Metodologia de Trabalho

O manguezal investigado localiza-se na região norte do Brasil, a aproximadamente 380 km a sudeste da foz do rio Amazonas (Figura 1), ocorre sobre extensas planícies lamosas de até 30 km de largura situadas entre os níveis altos da maré de sizígia e a média das marés, ocupando uma área de 466 km (Souza Filho e El-Robrini, 1995). A composição florística da vegetação de mangue na região é constituída por quatro espécies de mangue: *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (L.) L., *Avicennia schaueriana* Stapf and Leechman (Acanthaceae) e *Laguncularia racemosa* (L.) c. f. Gaertn (Combretaceae), sendo a espécie *R. mangle* predominante (Menezes e Mehlig, 2010).

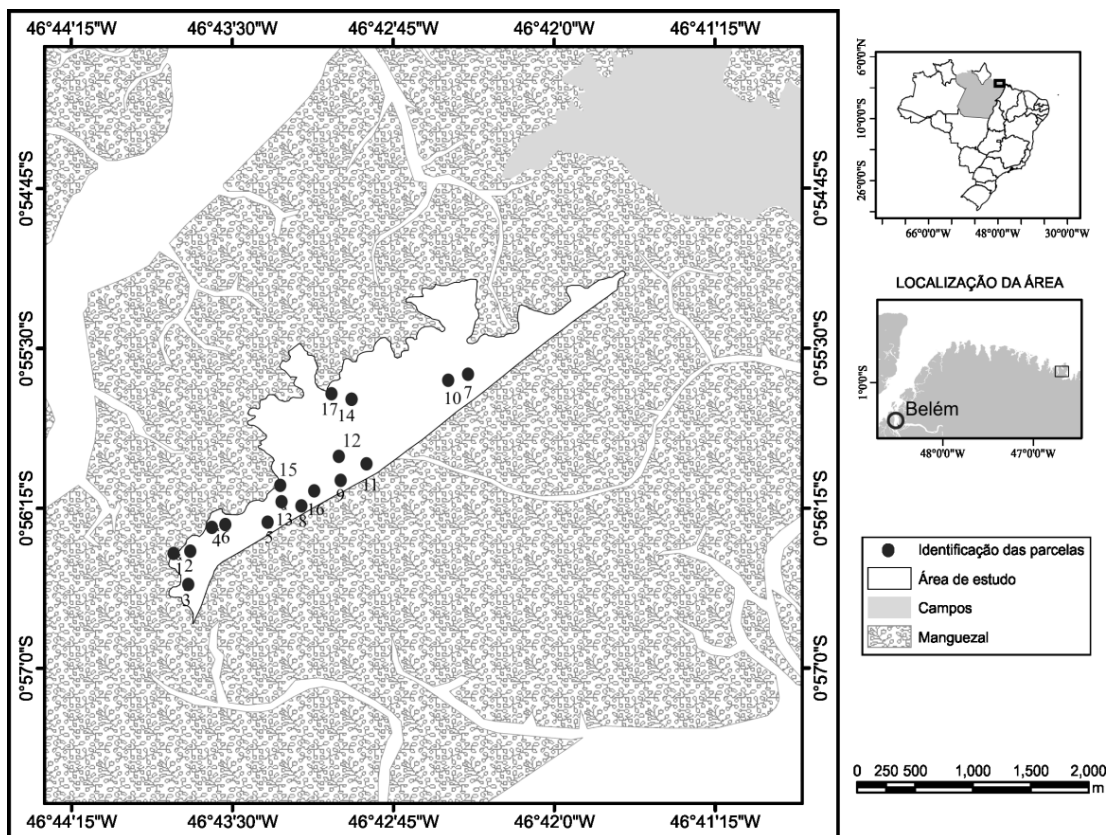


Figura 1 – Mapa da área de estudo com a localização das parcelas estudadas.

### *Dados SAR*

A imagem SAR Radarsat-2 multipolarizada utilizada datada do dia 11/06/2011 foi adquirida no modo *Fine Beam Mode* (FQ5), órbita descendente, banda C (5,6 cm), ângulo de incidência ~ 23,39°-25,28°, espaçamento em pixel de 4,73 x 4,98 m (*slant*). Na data de imageamento não houve precipitação (INMET) e condição era de maré vazante com altura de 3 metros (DHN). Todos os processamentos desta imagem foram efetuados no software PCI Geomatics 13.

A ortorretificação da imagem foi efetuada utilizando-se o *Toutin Radargrammetric model* (Toutin, 1995) e o modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com 8 pontos de controle de campo (GCP – *Ground Control Point*) e resultou em RMSE (*Root Mean Square Error*) de 12.2 m. O ruído *speckle* foi reduzido através do filtro Enhanced (Lee et al., 1999) com tamanho de janela de 5 x 5 pixels. Os valores lineares médios de retroespalhamento foram extraídos para cada parcela de 100 m<sup>2</sup> investigada, através do aplicativo VIMAGE/Focus/PCI. Uma imagem óptica RapidEye adquirida em 18/07/2011 foi utilizada para facilitar a locação das parcelas investigadas.

### *Atributos estruturais da vegetação de mangue em regeneração*

Através de análise visual da imagem RapidEye as parcelas foram definidas visando percorrer os estágios de regeneração da vegetação local, porém devido o elevado número de parcelas resultantes as mesmas foram submetidas a análise de agrupamento com base nos valores de retroespalhamento da imagem Radarsat-2. O inventário de tais parcelas foi efetuado durante duas campanhas de campo, em agosto e dezembro de 2012, para tal o posicionamento e a delimitação das parcelas foram determinados a partir do DGPS (ASTECH Z-Xtreme™) com auxílio de estação total TOPCON (GTS 210) que conferiu precisão decimétrica aos dados. Em cada parcela foram identificadas as espécies botânicas e foram mensurados os parâmetros biofísicos, circunferência à altura do peito (CAP) e a altura dos indivíduos, além das coordenadas geográficas de cada indivíduo. Posteriormente, os valores do diâmetro à altura do peito (DAP), área basal (AB), altura média e máxima e densidade foram calculados de acordo com Cintrón e Schaeffer Novelli (1984). Além disso, foi calculada a altura de Lorey de acordo com Avery e Burkhart (2002).

Os dados biofísicos foram submetidos a uma análise de agrupamento, através do método de distância Euclidiana, visando associar parcelas semelhantes em termos de desenvolvimento estrutural da vegetação. Um teste de análise de variância (ANOVA) foi aplicado nos grupos formados, para investigar diferenças significativas entre os mesmos e o teste *post-hoc* de Tukey (1953) investigou as diferenças dentro dos grupos, através de comparação múltipla dos grupos pareados.

### *Estimativa de biomassa*

As equações alométricas (1 a 4) propostas por Fromard et al. (1998) para os manguezais da Guiana Francesa foram utilizadas para a estimativa da biomassa da área em estudo, em virtude de não existir equações específicas para a costa de manguezais ao longo da Amazônia Brasileira.

- |                                 |                  |                                   |     |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------------|-----|
| - <i>Avicennia germinans:</i>   | 1cm < DAP < 4cm: | $y = 200,4 \text{ DAP}^{2,1}$ (g) | (1) |
|                                 | DAP > 4 cm:      | $y = 0,14 \text{ DAP}^{2,4}$ (Kg) | (2) |
| - <i>Laguncularia racemosa:</i> |                  | $y = 102,3 \text{ DAP}^{2,5}$ (g) | (3) |
| - <i>Rhizophora</i> spp.:       |                  | $y = 128,2 \text{ DAP}^{2,6}$ (g) | (4) |

### Modelagem dos atributos biofísicos a partir dos dados SAR

Modelos estatísticos de regressão simples e múltipla foram utilizados para analisar a relação entre os atributos estruturais e os valores de retroespalhamento, nos quais a variável independente foram os valores de retroespalhamento e os valores dos atributos estruturais como variável dependente. O desenvolvimento dos modelos seguiu a metodologia descrita por Neter et al. (1996). Diferentes ajustes foram verificados: linear, logaritmo, polinomial de 2° e 3° ordem, potência e exponencial. Para os modelos de regressão linear múltipla a seleção das variáveis foi baseada no método regressivo *Best subset* (Neter et al., 1996) e através dos critérios de decisão ( $r^2$ ,  $r^2_{ajustado}$  e  $C_p$  Mallow) nos quais o melhor ajuste com o menor número de variáveis explicativas possíveis é identificado. A validação dos modelos desenvolvidos foi efetuada pelos métodos PRESS (Soma dos Quadrados da Predição) e RMSE (*Root Mean Square Error*).

## 3. Resultados e Discussão

### Dados SAR

Os valores médios de retroespalhamento, em escala linear, extraídos da imagem Radarsat-2 para cada uma das parcelas estudadas são apresentados na Tabela 2. Em geral, as polarizações cruzadas apresentaram valores de retroespalhamento inferiores às polarizações paralelas. Isso resulta de maior retorno do sinal originado do espalhamento *double-bounce* que ocorre em copolarização juntamente com a diminuição do retroespalhamento das polarizações cruzadas pela ausência de copa das árvores, como descrito por Kovacs et al. (2008). A imagem Radarsat-2  $\sigma^{\circ}_{VH}$  e a localização das 17 parcelas estudadas em campo são apresentadas na Figura 2. O padrão de tonalidade desta imagem seguiu o descrito por Souza-Filho e Paradella (2002), no qual áreas em regeneração apresentam tons claros pelo predomínio do espalhamento volumétrico, pois os componentes do dossel favorecem o múltiplo espalhamento. Entretanto, as regiões da imagem com total ou parcial ausência de vegetação apresentam tons mais escuros, sugerindo espalhamento especular. Kovacs et al. (2008) mencionam que a ausência de copa nos manguezais degradados diminui a despolarização do sinal da polarização cruzada e resulta em menor retroespalhamento.

Tabela 1 – Valores médios de retroespalhamento em  $\sigma^{\circ}$  extraídos para as 17 parcelas.

$\sigma^{\circ}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
HH	0.117	0.131	0.148	0.018	0.045	0.319	0.104	0.241	0.496	0.222	0.073	0.259	0.092	0.145	0.3	0.346	0.493
HV	0.009	0.002	0.029	0.006	0.028	0.033	0.027	0.002	0.033	0.024	0.007	0.009	0.085	0.077	0.029	0.071	0.039
VH	0.011	0.001	0.03	0.006	0.039	0.03	0.023	0.005	0.028	0.028	0.008	0.015	0.078	0.073	0.032	0.049	0.09
VV	0.242	0.065	0.077	0.109	0.301	0.696	0.088	0.063	0.436	0.205	0.042	0.198	0.11	0.117	0.126	0.069	0.276

### Análise dos atributos estruturais da vegetação de mangue

A área total das parcelas estudadas foi de 1700 m<sup>2</sup>, onde foram medidos 2510 indivíduos vivos de *A. germinans*, 261 de *L. racemosa* e 30 de *R. mangle*, além de 289 indivíduos mortos, totalizando 3090 indivíduos. A análise de agrupamento possibilitou distinguir quatro estágios de desenvolvimento da vegetação posteriormente denominados: estágio recente, regeneração inicial, regeneração intermediária e regeneração avançada (Tabela 4). O teste ANOVA foi aplicado para o qual apenas a variável densidade mostrou diferença não significativa ( $p > 0.05$ ). O teste *post hoc*

de Tukey mostrou que a área basal e a biomassa apresentaram diferenças significativas entre os quatro grupos. Na Tabela 4 onde constam os atributos estruturais e as respectivas médias separadas por estágio fica clara a diferença entre os grupos principalmente para os atributos área basal e biomassa.

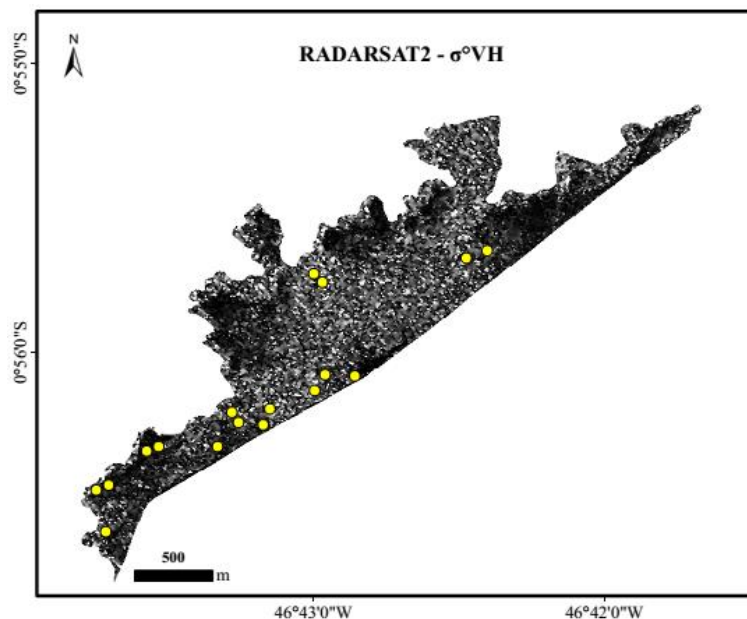


Figura 2 – Imagem Radarsat-2  $\sigma_{\text{VH}}^{\circ}$  com a localização das parcelas estudadas em campo.

Tabela 2 – Atributos estruturais das parcelas evidenciando os grupos formados.

Parcela	Grupos			Área Basal ( $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	DAP Médio (cm)	Altura Média (m)	Biomassa Total ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
		Espécie Dominante	Densidade ( $\text{N} \cdot \text{ha}^{-1}$ )				
1	I	<i>Avicennia</i>	1600	0,15	1,06	0,3	3,17
2			8100	1,13	1,21	0,37	27,56
3			14800	1,45	1,04	0,37	31,53
4			13900	3,72	1,55	0,46	109,35
5			19500	5,04	1,63	0,47	143,22
6			40300	5,75	1,18	0,38	160,47
7	II	<i>Avicennia</i>	31500	7,26	1,5	0,55	209,83
8			15800	8,31	2,28	0,93	261,98
9			11700	8,11	2,58	1,91	269,43
10			14800	10,43	2,62	2,03	335,62
11			10000	10,98	3,2	1,57	381,53
12	III	<i>Avicennia</i>	53700	14,56	1,63	1,18	435,13
13			7200	14,11	4,34	1,96	542,71
14	IV	<i>Avicennia</i>	17800	20,42	3,38	5,08	650,09
15			9000	18,34	4,35	2,09	735,74
16			6700	20,89	5,63	3,88	953,27
17			3700	20,78	6,9	6,39	1124,19

*Modelagem dos atributos estruturais da vegetação de mangue*

O coeficiente de correlação foi mais elevado para a relação do retroespalhamento nas polarizações cruzadas e os atributos estruturais (Tabela 3). A polarização VV obteve correlação baixa e negativa, que pode estar relacionada ao menor desenvolvimento das estruturas verticais da vegetação, ocasionando o oposto do descrito por van der Sanden (1997). Dentre os ajustes para as funções de regressão investigados o ajuste linear foi o que melhor se adequou.

Tabela 3 – Coeficiente de correlação entre atributos estruturais e o retroespalhamento da imagem Radarsat-2, destacados os valores do coeficiente de correlação mais elevados ( $p < 0.05$ ).

	<b>Altura Lorey</b> (m)	<b>Altura Média</b> (m)	<b>Altura Máxima</b> (m)	<b>DAP</b> (cm)	<b>Área Basal</b> (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	<b>Biomassa total</b> (Kg0.01ha <sup>-1</sup> )
$\sigma^{\circ}_{HH}$	<b>0,56</b>	<b>0,53</b>	<b>0,56</b>	<b>0,52</b>	0,47	<b>0,55</b>
$\sigma^{\circ}_{HV}$	<b>0,51</b>	<b>0,60</b>	<b>0,49</b>	<b>0,58</b>	<b>0,62</b>	<b>0,58</b>
$\sigma^{\circ}_{VH}$	<b>0,77</b>	<b>0,79</b>	<b>0,75</b>	<b>0,73</b>	<b>0,68</b>	<b>0,72</b>
$\sigma^{\circ}_{VV}$	-0.03	-0,07	-0,02	-0,16	-0,14	-0,12

Assim, para os modelos de regressão simples a variável independente foi o valor de retroespalhamento  $\sigma^{\circ}_{VH}$ . Nos modelos de regressão linear múltipla a multicolinearidade entre as variáveis independentes foi checada pelo VIF (valor de inflação de variância) que resultou em valores de 1.41, 1.13 e 1.27 para  $\sigma^{\circ}_{HH}$ ,  $\sigma^{\circ}_{VH}$ , e  $\sigma^{\circ}_{VV}$ , respectivamente, valores inferiores ao valor limite de 10 mencionado por Neter *et al.* (1996). Os parâmetros de tais modelos constam na Tabela 4. Na análise dos resíduos os modelos cumpriram os pressupostos propostos por Neter *et al.* (1996). Mediante os valores de PRESS pode-se considerar que houve adequação dos modelos principalmente para os modelos relacionados à estrutura horizontal da vegetação (Tabela 5).

Tabela 4 – Parâmetros dos modelos de regressão simples e múltipla.

	<b>Altura Lorey</b>		<b>Altura Média</b>		<b>Altura Máx.</b>		<b>DAP</b>		<b>Área Basal</b>		<b>Biomassa T.</b>	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
$r^2$	<b>0,59</b>	<b>0,79</b>	<b>0,63</b>	<b>0,81</b>	<b>0,57</b>	<b>0,68</b>	<b>0,53</b>	<b>0,79</b>	<b>0,46</b>	<b>0,67</b>	<b>0,52</b>	<b>0,79</b>
$\beta_0$	0,020	-0,515	0,049	-0,191	0,817	-0,593	0,473	1,033	0,021	0,038	87,056	39,009
$\beta_1$ (HH)	-	0,502	-	0,468	-	0,636	-	0,531	-	0,472	-	0,562
$p$	-	0,006	-	0,007	-	0,001	-	0,004	-	0,027	-	0,003
$\beta_2$ (VH)	0,770	0,641	0,792	0,677	0,753	4,323	0,729	0,604	0,681	0,571	0,723	0,586
$p$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,001	0,001	0,003	0,005	0,001	0,001
$\beta_3$ (VV)	-	-0,329	-	-0,356	-	-	-	-0,465	-	0,422	-	-0,444
$p$	-	0,040	-	0,022	-	-	-	0,007	-	0,035	-	0,009
$e$	1,789	1,396	1,125	0,870	2,592	2,312	1,219	0,882	0,053	0,045	234,83	168,110
<b>F</b>	21,909	15,869	25,237	18,087	19,587	14,743	16,979	16,033	12,950	8,788	16,430	16,109
$p$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,003	0,002	0,001	0,000

S - Modelo de regressão simples

M - Modelo de regressão múltipla

Tabela 5 – Valores de PRESS e a porcentagem da diferença do SQR e os valores de RMSE.

Atributo	Simples				Múltiplo			
	PRESS	SQR	%	RMSE	PRESS	SQR	%	RMSE
Alt. Lorey	79,47	48,03	39,56	1,68	53,59	25,35	52,69	1,22
Alt. Média	28,61	18,98	33,68	1,05	18,50	9,84	46,82	0,76
Alt. Máx.	162,38	100,80	37,92	2,43	140,51	74,83	46,74	1,82
DAP	29,69	22,30	24,89	1,14	15,69	10,12	35,53	0,77
AB	0,052	0,043	17,47	0,05	0,04	0,03	39,80	0,04

Para a estrutura vertical da vegetação o modelo para altura média obteve maior capacidade preditiva com base no valor do RMSE. Para estimativa da estrutura horizontal, o modelo para o DAP apresentou a melhor capacidade preditiva, porém os outros modelos foram igualmente satisfatórios (Tabela 5). Comparando os métodos de modelagem verificados fica evidente o aumento dos valores de  $r^2$  quando inseridos os valores de retroespalhamento em  $\sigma_{HH}^{\circ}$  e  $\sigma_{VV}^{\circ}$  como variáveis explicativas. O poder explicativo aumentou entre 11 - 19% para os modelos de estimativa de altura e entre 20 - 27% para os modelos de estimativa da estrutura horizontal e biomassa. Os valores de RMSE diminuíram com a adição destas variáveis e o mesmo ocorreu para os valores de PRESS, o que segundo Rencher e Schaalje (2007) indica que estes modelos devem ser escolhidos em detrimento dos modelos de regressão simples.

#### 4. Conclusões

A vegetação de mangue em regeneração apresentou grande amplitude de variação dos dados, sendo a variável área basal a que melhor diferenciou os estágios de regeneração, possibilitando diferenciar quatro estágios denominados: estágio recente, regeneração inicial, regeneração intermediária e regeneração avançada. A espécie dominante e em maior número foi a *Avicennia germinans*. O retroespalhamento apresentou correlações fortes e significativas com os dados estruturais da vegetação de mangue em regeneração, principalmente na imagem  $\sigma_{VH}^{\circ}$ . O modelo de regressão múltipla com as polarizações  $\sigma_{HH}^{\circ}$ ,  $\sigma_{VH}^{\circ}$ ,  $\sigma_{VV}^{\circ}$  apresentou alta capacidade preditiva principalmente para as variáveis: altura média ( $r^2=0.81$ ), DAP ( $r^2=0.79$ ) e biomassa ( $r^2=0.79$ ). Finalmente, estes dados contribuem para compreensão da vegetação em estágios de regeneração na região e servem de subsídio no implemento de métodos apropriados para a reabilitação e restauração de florestas de mangue em regeneração. Além de demonstrarem a grande aplicabilidade de dados SAR na estimativa de atributos da vegetação de mangue em regeneração.

#### Referências

- Alongi, D. M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. **Environmental Conservation**, v. 29, n. 03, p. 331-349
- Avery, T. E.; Burkhart, H. H. 2002. **Forest measurements vol. 5**, Mc Graw Hill, New York, pp. 456.
- Cintrón, G. M.; Schaeffer-Novelli, Y. 1984. Methods for studying mangrove structure. In: Snedaker, S. C. e Snedaker, J. G. (Ed.), **The mangrove Ecosystem: research methods**, UNESCO, Paris, 91-113. pp.
- Comley, B. W. T.; Mcguinness, K. A. 2005. Above- and below-ground biomass, and allometry of four common northern Australian mangroves. **Australian Journal Botany**, 53, p. 431-436.
- Fromard, F.; Puig, H.; Mougou, E.; Marty, G.; Betoulle, J. L.; Cadamuro, L. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. **Oecologia**, 115 (1-2), p. 39-53.
- Hogarth, P. J. 1999. **The biology of mangroves**. Oxford University Press, 288p.
- Khatiresan, K.; Bingham, B. L. 2001. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. In: Lesser, M. (Ed.), **Advances in Marine Biology**, University of New Hampshire, Durham, 40, 81 - 251. pp.

- Kovacs, J.; Vandenberg, C. V.; Wang, J.; Flores-Verdugo, F. 2008. The Use of Multipolarized Spaceborne SAR Backscatter for Monitoring the Health of a Degraded Mangrove Forest. **Journal of Coastal Research**, 241, p. 248-254.
- Kovacs, J. M.; Vandenberg, C. V.; Flores-Verdugo, F. 2006. Assessing fine beam RADARSAT-1 backscatter from a white mangrove (*Laguncularia racemosa* (Gaertner)) canopy. **Wetlands Ecology and Management**, 14, p. 401-408.
- Kovacs, J. M.; Jiao, X.; Flores-De-Santiago, F.; Zhang, C.; Flores-Verdugo, F. 2013. Assessing relationships between Radarsat-2 C-band and structural parameters of a degraded mangrove forest. **International Journal of Remote Sensing**, 34 (20), p. 7002–7019.
- Kovacs, J. M.; Lu, X. X.; Flores-Verdugo, F.; Zhang, C.; Flores-De-Santiago, F.; Jiao, X. 2013. Applications of ALOS PALSAR for monitoring biophysical parameters of a degraded black mangrove (*Avicennia germinans*) forest. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 82, p. 102–111.
- Lee, J. S.; Grunes, M. R.; De Grandi, G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 37 (5), p. 2363 - 2373.
- Lugo, A. E.; Snedaker, S. C. 1974. The Ecology of Mangroves. **Annual Review of Ecology and Systematics**, 5 (1), p. 39-64.
- Menezes, M. P. M.; Mehlig, U. 2010. Floristics and Forest Structure - Mangrove Vegetation of the Caeté Estuary. In: Saint-Paull, U. e Schneider, H. (Ed.), **Mangrove Dynamics and Management in North Brazil**, 211, 422. pp.
- Mougin, E.; Proisy, C.; Marty, G.; Fromard, F.; Puig, H.; Betouille, J. L.; Rudant, J. P. 1999. Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 37 (1), p. 94-102.
- Neter, J.; Kutner, M. H.; Nachtsheim, C. J.; Wasserman, W. 1996. **Applied linear statistical models**. vol. 4, Mc Graw-Hill, Boston, pp. 1408.
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Trichon, V.; Karam, M. A. 2002. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forests. **International Journal of Remote Sensing**, 23 (20), p. 4197-4210.
- Ranson, K. J.; Sun, G. 1994. Mapping Biomass of a Northern Forest Using Multifrequency SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 32, p. 388-396.
- Simard, M.; Zhang, K.; Rivera-Monroy, V. H.; Ross, M. S.; Ruiz, P. L.; Castañeda-Moya, E. 2006. Mapping Height and Biomass of Mangrove Forests in Everglades National Park with SRTM Elevation Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 72 (6), p. 299-311.
- Souza Filho, P. W. M.; El-Robrini, M. 1995. Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da Planície Costeira Bragantina, Nordeste do Pará, Brasil. **Geonomos**, v. 4, n. 2, p. 1-16.
- Souza Filho, P. W. M.; Paradella, W. R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. **Wetlands Ecology and Management**, 10, p. 123-132.
- Souza Filho, P. W. M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427-435
- Spalding, M.; Kainuma, M.; Collins, L. 2010. **World Atlas of Mangrove**. vol. 2 International Society for Mangrove Ecosystems The Nature Conservancy, UK, pp. 336.
- Toutin, T. 1995. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. **International Journal of Remote Sensing**, 16, p. 2795-2811.
- Tukey, J. W. 1953. **The problem of multiple comparisons**. Mimeographs Princeton University,
- Van Der Sanden, J. J. 1997. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 330 p. Wageningen Agricultural University, Netherlands.